

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(11) (2021) 795-798 DOI: 10.22060/mej.2019.15261.6077

Experimental Study of Premixed Methane-Air Flame Propagation in a Closed Duct with Porous Obstacle

H. Kolahdooz¹, M. H. Kayhani¹, M. Nazari^{1*}, R. Ebrahimi²

¹ Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The propagation and shape of methane-air premix flame in an enclosure with dimensions of $50 \times 11 \times 8$ cm and the effect of the porous obstacle with a porosity percentage of 95 with 20 cavities per square inch in the flow path has been studied in a laboratory. The study of flame behavior has been done with high speed camera photography. The pressure variations inside the enclosure are recorded with the help of a pressure sensor and converter located on top of the enclosure. The range of pressure variations has been adapted to the reference samples and has been validated. The location of the porous obstacle has been tested for four different distances of 5, 10, 15 and 20 cm from the spark plug. The results for the four porous obstacle states indicate that the turbulence created in the flow field can change the location of formation of the tulip flame, as well as its formation time. For a distance of 20 cm the porous obstacle from the spark location, the turbulence of the flow field is at its maximum within 4 different distances, and the flame front is formed with a fundamental difference similar to the flame of the classic tulip flame.o, the greatest amount of pressure in the inner span of the wing and near the edge of the wing attack is observed.

Review History:

Received: 2018/11/07 Revised: 2019/01/11 Accepted: 2019/03/11 Available Online: 2019/03/20

Keywords: Combustion Premixed methane-air Porous obstacle Closed duct Tulip flame

1-Introduction

The propagation of flames in closed tubes has been the subject of combustion research since the late 1800s (Mallard and Le Chatelier, 1883). Because of the lack of energy, as well as greenhouse gas emissions, improving the thermal efficiency of combustion engines and reducing greenhouse gas emissions is a significant issue in combustion research and development of combustion engines. Gaining an understanding of the dynamics of premixed flame propagation in confined spaces is of great importance considering both gas explosion dynamics and the burning processes of typical internal combustion engines explanation [1]. Generally, the propagation of a premixed flame in a closed duct is a complex issue compared to flame propagation in an unconfined space, which can generate different structures, including curved, flat, cusped and cellular fronts in the early stage. The flame propagation is affected by many factors including special installations, flame, acoustic, and hydrodynamic instabilities [2]. The thermal expansion of the combustion products plays a vital role in the initial acceleration of the flame and the flame is unstable due to the intrinsic hydrodynamic instability that results from thermal expansion [3]. One of the curious phenomena is the tulip flame which is characterized by a shape concaved from the unburned mixture to the burnt gas. Ellis first reported the inversion images of premixed flame surfaces in 1928, after which this particular flame shape

was named the "tulip" flame by Salamandra. The onset of tulip flame is the significant characteristics of the flame front deformation and the transition from laminar to highly turbulent combustion. Four stages can be distinguished in the tulip flame propagation according to Clanet and Searby [4], i.e. spherical/hemispherical flame, finger-shaped flame, flame with its skirt touching the tube side walls, and tulip flame and Bychkov et al. [1] developed an analytical theory of flame acceleration and the stages of the tulip flame formation. Chen et al. [6] studied the effect of porosity on the closed duct walls for a methane-air mixture. He showed that porous material on the wall affects the transverse waves, reducing the inversion of the flame front and delaying the onset of the tulip flame. The most important issue in the further development of combustion science is better understanding and adequate modeling of turbulent combustion. Therefore, in current work, an experimental framework designed to demonstrate the effects of creating turbulence in the formation of tulip flame in a closed duct. Also, the flame behavior of methane-air stoichiometric mixture in the closed duct in three conditions: unobstructed enclosure, the presence of the porous obstacles and presence of the block obstacles in the path of combustion flow are considered. Moreover, the effect of the presence of porous obstacles and their interaction on the flame formation and turbulence are considered.

*Corresponding author's email: mnazari@shahroodut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visi https://mej.aut.ac.ir/article_3347.html.

2- Methodology

The experimental setup as shown in Fig. 1, is mainly consisted of a constant volume combustion chamber with dimensions of $11 \times 8 \times 50$ cm, a high-speed camera (Dimax-s), a pressure transducer (ADAM 6017), a gas mixing device and a high-voltage ignition system. The experiments are carried out at an initial temperature of 25 °C and a mixture initial pressure of 1 bar.



Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus including (1) spark plug, (2) pressure transducer, (3) charge and discharge valves, (4) gas mixing equipment, (5) high-speed camera and (6) obstacles

The combustion chamber is a horizontal rectangular duct made of 304 stainless steel with a thickness of 15 mm. Inside surfaces are completely polished using sandpaper with a roughness of 400-grit. The side view of the chamber has been made of transparent Plexiglas with a thickness of 20 mm to record the flame propagation. The spark plug, which is ignited by a high-voltage transformer, is located in the center of the first chamber. The Dimax-s's high-speed camera with color capture capability and 4500 Frames Per Second (fps) is used to capture the flame growth. In order to improve image quality, flame photography is performed in a dark room. Due to the combustion rate and the quality of the images, the high-speed camera is set on 1000 fps in this experiment. The pressure rise inside the enclosure is measured through the WIKA pressure transducer model S-10 and is recorded on the local computer using the ADAM data recorder model 6017. The obstacles are made of nickel and have a porosity of 95% with 20 pores per square inch. Dimensions of each porous obstacle are $0.5 \times 2 \times 11$ cm. The effect of these obstacles is investigated in four different distances from the spark plug (case 1, 2, 3, 4), i.e. 5, 10, 15 and 20 cm. Preparation of methane-air stoichiometric mixture is performed using partial pressure method.

3- Results and Discussion

3-1- Flame behavior in the closed duct without an obstacle

Fig. 2 shows the images taken from the process of propagating the flame in front of methane-air stoichiometry. The results of the formation of classical tulip flame, which include the formation of spherical flame, fingers, flat state and tulip formation, and in terms of the shape and sequence of the flame growth stages, are very similar to the results of [4-6], and according to the results of Matalon and Metzner [5], the flame front was flattened in the middle of the channel.



Fig. 2. High-speed images of premixed methane-air flame front in the closed duct at a pressure of 1 bar.

3- 2- Flame behavior in the closed duct with the porous obstacles Fig. 3 shows the flame propagation images in case 3. As can be seen, the appearance of the flame front is slightly different, and the degree of turbulence in the flow field, as well as the boundary layer near the wall, is greater than the two previous cases.

Fig. 4 shows the location of the flame front as a function of time for five different cases (0, 1, 2, 3, and 4). According to the diagram, the process of flattening the flame front, the velocity of the flame front approaches zero, which is shown in the curve of the flame position variation as a slope of zero in the curve.



Fig. 3. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 15 cm from the spark plug (the time interval between consecutive images is 5 ms).



Fig. 4. The position of the flame front as a function of time for five different cases.

Considering this, the formation of a flat flame front as an introduction to the formation of tulip flame, in an unobstructed enclosure at a distance of 25 cm (50 ms), case 1 at a distance of 25 cm (48 ms), for case 2 at a distance 29 cm (51 ms), for the case 3 at 32 cm distance (51 ms), and for case 4, at 36 cm distance (60 ms), starts from the spark plug.

4- Conclusions

The results of the effect of the porous obstacles on the combustion flow field and the pattern of flame propagation in the closed duct have clearly been shown. The results of the experiments show that:

The obstruction formed in the flow path is important from

two points: first, the decrease of the Reynolds flame causes an increase in the burning rate and acceleration of the flame front; secondly, obstruction increases the Reynolds flow and turbulence, which results in an increase in the surface of the flame front helps and increases burning rate.

The maximum pressure of the chamber with the presence of the porous obstacles in four cases (1, 2, 3, 4) was reduced by 6, 9, 3 and 11 percent, respectively, compared to the absence of the obstacle.

5- References

- V. Bychkov, V.y. Akkerman, G. Fru, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Flame acceleration in the early stages of burning in tubes, Combustion and Flame, 150(4) (2007) 263-276.
- [2] M. Gonzalez, R. Borghi, A. Saouab, Interaction of a flame front with its self-generated flow in an enclosure: The "tulip flame" phenomenon, Combustion and Flame, 88(2) (1992) 201-220.
- [3] C. Clanet, G. Searby, On the "tulip flame" phenomenon, Combustion and Flame, 105(1-2) (1996) 225-238.
- [4] D. Dunn-Rankin, P. Barr, R. Sawyer, Numerical and experimental study of "tulip" flame formation in a closed vessel, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1988, pp. 1291-1301.
- [5] M. Matalon, P. Metzener, The propagation of premixed flames in closed tubes, Journal of Fluid Mechanics, 336 (1997) 331-350.
- [6] P. Chen, F. Huang, Y. Sun, X. Chen, Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 47 (2017) 22-28.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۲۲۵ تا ۳۲۴۰ DOI: 10.22060/mej.2019.15261.6077

مطالعه آزمایشگاهی نحوه انتشار شعله پیش آمیخته متان–هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل

حبيب كلاهدوز '،محمد حسن كيهاني'، محسن نظري '*، رضا ابراهيمي ّ

ا دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران ^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاريخچه داوري: **خلاصه**:نحوه انتشار و شکل جبهه شعله پیش آمیخته استوکیومتری متان-هوا در یک محفظه بسته با ابعاد ۵۰ cm×۱۱×۸ و اثر مانع متخلخل با درصد تخلخل ۹۵ با ۲۰ حفره در اینچ مربع در مسیر جریان، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. رفتار شعله به کمک عکس برداری با دوربین سرعت بالا مطالعه شده که جهت عکس برداری یک وجه محفظه با ابعاد۸ cm مدمد از جنس پلکسی گلس شفاف ساخته شده است. تغییرات فشار داخل محفظه به کمک سنسور و مبدل فشار که در بالای محفظه نصب شده ثبت می گردد. دامنه تغییرات فشار و محل تشکیل شعله گل لاله نیز با نمونه کارهای مرجع معتبرسازی شده است. موقعیت مکانی مانع متخلخل برای چهار فاصله مختلف cm ۵، ۱۵ cm ،۱۰ cm و ۲۰ cm از محل جرقه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج برای چهار حالت با حضور مانع متخلخل نشان میدهد که آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان میتواند موقعیت مکانی تشکیل شعله گل لاله و همچنین زمان تشکیل آن را جابجا کند. برای فاصله ۲۰ cm مانع متخلخل از محل جرقه، آشفتگی میدان جریان به میزان حداکثر خود در بین ۴ فاصله مختلف مانع رسیده و جبهه شعله با تفاوت اساسی مشابه شعله گل لاله کلاسیک تشکیل می شود.

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۳۹۷ بازنگری: ۲۱–۱۳۹۷ پذیرش: ۲۰–۱۳۹۷ ارائه آنلاین: ۲۹–۱۲–۱۳۹۷ كلمات كليدى: احتراق

مخلوط استوكيومترى متان-هوا مانع متخلخل محفظه بسته شعله گل لاله

منبسط شده و مخلوط نسوخته را به طرف جلو می راند. اصطکاک بر

روى ديواره موجب غير يكنواختى جريان سيال شده و جبهه شعله

را خميده مي كند. به اين ترتيب سرعت شعله افزايش يافته و شعله

شتاب دار می شود. با این حال از زمان شلکین یک نظر مشترک وجود

دارد که شتاب گرفتن شعله بدون جریان آشفتگی غیر ممکن است

[۴]. پیشنهادهای دیگر در مورد شتاب گرفتن شعله مطرح شده است

از جمله، ناپایداری هیدرودینامیکی لاندا-داریوس^۲ [۵ و ۶] و حالت

انتقال شعله کروی به شعله تخت هنگام انتشار شعله در داخل یک

بایچکوف^۳ و همکاران [۴] تئوری تحلیلی در مورد شتاب گرفتن

شعله آرام در لوله با یک انتهای بسته و شرط عدم لغزش در دیواره

و آدیاباتیک بودن دیواره را توسعه دادهاند. آنها با توجه به تعریف

رینولدز برای دینامیک احتراق که متفاوت از رینولدز استاندارد جریان

می باشد، برای شتاب بی بعد شعله رابطه (۱) و همچنین برای سرعت

۱- مقدمه

با افزایش نگرانی در مورد کمبود انرژی و تولید گازهای گلخانهای، تحقیقات در مورد بهبود بازده حرارتی موتورهای احتراقی و کاهش انتشار گازهای آلاینده به موضوع اصلی تحقیقات در زمینه احتراق و همچنین توسعه موتورهای احتراقی تبدیل شده است [۱]. همچنین به دست آوردن شناخت از ساختار انتشار شعله پیشآمیخته در فضاهای محصور اهمیت بسیار ویژهای جهت درک دینامیک انفجار گازها و فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی دارد [۲]. احتراق در محیط بسته دارای پیچیدگی بسیار بیشتری نسبت به احتراق در فضای باز بوده و انبساط حرارتی محصولات احتراق نقش کلیدی در شتاب اوليه شعله را دارد.

اولین توضیح در مورد شتاب گرفتن شعله توسط شلکین [۳] ارائه شده است. او بر اساس شرط عدم لغزش بر روی دیواره شتاب گرفتن شعله را توضیح داد. با انتشار جبهه شعله، مخلوط سوخته

Shelkin

3 Bychkov

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

لوله [۷].

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir

Darrieus-Landau

سوزش رابطه (۲) را ارائه کردند. آنها نشان دادند که با افزایش رینولدز میزان شتاب شعله کاهش پیدا می کند. به عنوان مثال با کاهش مقطع کانال (R) رینولدز کاهش پیدا کرده و در نتیجه آن شتاب بی بعد افزایش می ابد و با توجه به رابطه (۲) سرعت سوزش نیز افزایش می بید. لازم به توضیح است که سرعت سوزش نشان سرعت نرمال جبهه احتراق U_f متفاوت است. سرعت سوزش نشان می دهد که چه مقدار سوخت بر حسب زمان توسط کل جبهه شعله مصرف شده است.

$$\sigma = \frac{\Theta^2}{\operatorname{Re}_{flame}}, \quad \operatorname{Re}_{flame} = \frac{RU_f}{\nu}, \quad \Theta = \frac{\rho_f}{\rho_b} \tag{1}$$

$$U_w \propto \exp(\sigma \cdot \tau), \ \tau = U_f t / R$$
 (1)

بایچکف و همکاران [۲] با توسعه حل تحلیلی برای شتاب گرفتن شعله آرام در مراحل اولیه رشد شعله در یک لوله طولانی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی کلنت و سربی [۷] که برای مخلوط پروپان-هوا بدر داخل یک لوله که از یک انتها باز است، نشان داد که شتاب شعله مستقل از رینولدز شعله بوده و تنها به ضریب انبساط مخلوط ($\frac{\rho_{\rm f}}{\rho_{\rm b}} = \Theta$) وابسته است و همچنین برای موقعیت جبهه شعله در مراحل اولیه رشد رابطه (۳) را ارائه کردهاند.

$$\xi_{\rm tip} = \frac{\Theta}{2\alpha} \sinh(2\alpha\tau), \ \xi_{\rm tip} = \frac{Z_{\rm tip}}{R}, \alpha = \sqrt{\Theta(\Theta - 1)}, \tau = \frac{U_{\rm f}t}{R}$$
(°)

که در آن Z محور طولی بیبعد، R شعاع لوله، Z محور طولی و ${\cal F}_{tip}$ زمان بی بعد میباشد.

والیف و همکاران [۸] با استفاده از نتایج تحلیلی بایچکف [۲] مدلی برای شتاب انتشار شعله در لوله با حضور مانع برای تحلیل فرآیند گذر از احتراق به انفجار به صورت رابطه (۴) ارائه کردهاند که در آن d ضخامت مانع، Δz فاصله دو مانع از یکدیگر و β نسبت انسداد است.

$$\sigma = (1 - d/\Delta z) \frac{\Theta - 1}{1 - \beta} \tag{f}$$

در طی انتشار شعله در یک محفظه بسته شعله تحت تأثیر مجموعهای از اثرهای مختلف از جمله نیروی شناوری، ناپایداری هیدرودینامیکی ، ناپایداری نفوذ حرارتی، ناپایداری رایلی-تیلور، لایه

1 Valiev

مرزی و غیره قرار می گیرد که آن را ناپایدار و نامنظم میسازد [۱۳–۹].

الیس [۱۰] برای اولین بار این پدیده را مشاهده کرد و دریافت که شکل شعله ناگهان از حالت انگشتی به حالت تخت و در مرحله بعد سريعاً به صورت مقعر به داخل مخلوط سوخته برگشت مي كند. به کمک تکنیکهای عکسبرداری نشان داده شده است که شکل شعله تغییرات پیچیده ای دارد و جالب ترین حالت آن، شعله گل لاله" نام دارد که توسط سالامندرا و همکاران ٔ اولین بار به این اسم نام گذاری شده است [۱۳]. بسیاری از مطالعات به دلیل پیچیدگی پدیدهی شعله گل لاله، بر روى آن تمركز كردهاند و همچنان نقاط ابهام و اختلاف نظر در آن وجود دارد. مارکستین^۵ [۱۴] دینامیک شعله مشابه گل لاله را برای شعله آرام در تعامل با موج فشاری را مشاهده کرد و این پدیده را با تئوری ناپایداری تیلور توضیح داد. اما استارک⁹ و همکاران [10] و کلنت^۷ و سربی^۸ [۷] معتقد بودند که ناپایداری تیلور به دلیل کاهش سرعت نوک شعله است و نه به دلیل موجهای فشاری، این کاهش سرعت به دلیل اثر خنک شدن شعله در تماس با دیوار محفظه بوده كه نتيجه آن كاهش سطح جبهه شعله است. دان رانكين و همکاران [۱۶] و گنزالس^{۱۰} و همکاران [۱۷] به کمک شبیهسازی عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که گرادیان سرعت عرضی در امتداد جبهه مسطح شعله و ناپایداری لاندا-داریوس'' نقش مهمی در وارونگی گل لاله ایفا می کنند. دان-رانکین [۱۸] پیشنهاد کرد که شعله لالهای شکل در اثر ترکیب مکانیزمهای مختلف می تواند ایجاد شود.

کلنت و سربی [۷] اولین تقسیم بندی تغییرات دینامیک شعله پیش آمیخته در محفظه باز و بسته را انجام دادهاند که به چهار مرحله تقسیم می شود: (۱) شعله نیم کره در حال انبساط که هنوز تحت اثرات دیوارها قرار نگرفته است؛ ۲) شعله با حالت انگشتی و سرعت رشد نمایی؛ (۳) شعله کشیده که از ناحیه جانبی در تماس با دیواره قرار گرفته است؛ (۴) وارونگی جبهه شعله که به اسم شعله گل

2 Ellis

- 4 Salamandra et al.
- 5 Markstein
- 6 Starke 7 Clanet
- 7 Clanet8 Searby
- 9 Dunn-Rankin
- 10 Gonzalez
- 11 Darrieus-Landau

³ Tulip Flame



شکل ۱ : نمای واقعی مجموعه آزمایشگاهی Fig. 1. Real view of the experimental apparatus.

و ساختار شعله در مقایسه با متان خالص می گردد و در عین حال استیلن دارای سریعترین سرعت پخش شعله و فشار حداکثر به علت بالاتر بودن سرعت واکنش شیمیایی میباشد. چن⁶ و همکاران [۲۴] اثر تخلخل بر روی دیوارههای محفظه بسته برای مخلوط پیش آمیخته متان-هوا را مورد مطالعه قرار داده است. او نشان داد مواد متخلخل روی دیواره در امواج عرضی شکل گرفته اثر گذاشته که موجب کاهش فاصله وارونگی جبهه شعله و به تأخیر افتادن آغاز شعله گل لاله شود. در کار حاضر رفتار شعله مخلوط متان-هوا با نسبت همارزی² برابر یک در یک محفظه بسته در دو حالت: محفظه بدون مانع و با مورد مطالعه قرار گرفته است. حضور مانع متخلخل به دلیل ایجاد مورد مطالعه قرار گرفته است. حضور مانع متخلخل به دلیل ایجاد آشفتگی در میدان جریان احتراقی تأثیر ویژهای بر سرعت احتراق و همچنین ساختار تشکیل جبهه شعله داشته و این مهم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- شرح تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ و ۲ به صورت نمای واقعی و شماتیک نشان داده شده است. محفظه بسته احتراق دارای طول ۲۵ ۵۰، ارتفاع ۸ ۸ و عمق ۱۱ cm میباشد. جنس ورق به کار رفته برای ساخت محفظه، فولاد زنگنزن میباشد. بنا محفظه با استفاده ۳۰۴ به ضخامت ۱۵ mm میباشد. سطوح داخلی محفظه با استفاده از سمباده با درجه زبری ۴۰۰ به طور کامل صیقل داده شده است.

لاله نام گذاری شده است. شیائو و همکاران [۱۹] رفتار انتشار شعله پیشآمیخته هیدروژن-هوا را در یک کانال افقی با مقطع مستطیل در حالت بسته و حالت انتهای باز را به طور تجربی برای نسبتهای همارزی مختلف مطالعه کرده و نشان دادند که نسبت هم ارزی تأثیر قابل توجهی بر تشکیل شعله گل لاله دارد. شیائو و همکاران [۲۰] اثر موقعیت جرقه را در انتشار شعله پیشآمیخته هیدروژن-هوا در محفظه بسته، مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که موقعیت جرقه تأثیر قابل توجهی بر دینامیک شعله دارد. شن^۲ و همکاران [۲۱] مطالعه آزمایشگاهی مشابه برای مخلوط هیدروژن-هوا و پروپان-هوا و مقایسه رفتار این دو مخلوط با هم انجام دادهاند. زنگ^۳ و همکاران [۲۲] تأثیر درصد هیدروژن در مخلوط پیش آمیخته متان-هیدروژن-هوا و ابعاد محفظه بسته احتراق را به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده است. او نشان داد در مواردی که میزان هیدروژن کمتر بوده شکل شعله نامتقارن شده و قسمت پایینی هلالی شکل شعله گل لاله با سرعت كمترى نسبت به قسمت بالايى آن منتشر مىشود. جين ً و همكاران [٢٣] رفتار جبهه شعله متان-هوا، استيلن-هوا و گاز طبیعی-هوا را به طور مشابه و آزمایشگاهی مطالعه کرده است. او نشان داد که ماهیت سوخت گازی تأثیر قابل توجهی بر سرعت انتشار شعله و شکل آن دارد. مقدار کم اتان و پروپان موجود در گاز طبیعی باعث افزایش شتاب انتشار شعله و افزایش فشار و اختلاف در شکل

⁵ Chen

⁶ Equivalence ratios

¹ Xiao

² Shen

³ Zheng

⁴ Jen



شکل ۳ : تصویر مانع متخلخل در داخل محفظه در فاصله ۵ cm از محل جرقه

Fig. 3. Image of the porous obstacles inside the closed .duct at a distance of 5 cm from the spark location

میدهد استفاده شده و جهت ثبت اطلاعات در کامپیوتر از ثبت کننده اطلاعات^۳ ADAM مدل ۶۰۱۷ با سرعت ۵۰ میلی ثانیه استفاده شده است.

برای تهیه مخلوط پیشآمیخته متان-هوا از یک محفظه اختلاط که از لوله آهنی بدون درز با قطر ۶ اینچ و ضخامت ۷ میلیمتر و طول ۲۵ سانتیمتر ساخته شده استفاده شده است. حجم محفظه اختلاط تقريباً ۵ درصد بزرگتر از محفظه احتراق طراحی شده است. فرآيند اختلاط به اين صورت مي باشد كه ابتدا محفظه اختلاط دارای فشار نسبی صفر از هوای خشک خروجی کمپرسور پر بوده و به میزان ۰/۴ bar فشار متان با درجه خلوص ۹۹/۹۹ درصد به داخل محفظه اختلاط تزریق می شود. در ادامه تا فشار نسبی نهایی bar هوای خشک خروجی از کمپرسور به داخل محفظه تزریق می شود. با توجه به در نظر گرفتن فشار اولیه bar در محفظه احتراق برای انجام آزمایشها، مخلوط آماده شده برای انجام سه دفعه آزمایش کافی میباشد. با استفاده از فشارهای نسبی $(P_{ch +} = \cdot / + bar, P_{air} = - / + bar, P_{air} = - - + bar, P_{air} = - - + bar)$ مطلق هر گاز کسر مولی متان و هوا در مخلوط تهیه شده با توجه به رابطه $C_{ch} = \frac{1}{4} - \frac{1}{2} - \frac{1}$ و برای حالت استوکیومتری با توجه به رابطه (۶) $C_{stoic-cht} = 1/1 \cdot 1/\Delta t = \cdot 1/2 \Delta t, C_{stoic-cht} = 9/\Delta t/1 \cdot 1/\Delta t = \cdot 1/9 \cdot \Delta t$ می باشد. با توجه به رابطه (۷) و کسر مولی های گاز، نسبت هم ارزی



شکل ۲ : شماتیک مجموعه آزمایشگاهی ۱) جرقهزن (شمع) ۲) سنسور فشار ۳) ورودی و خروجی گاز ۴) مجموعه تهیه مخلوط پیش آمیخته و تزریق گاز ۵) دوربین سرعت بالا ۶) موانع متخلخل

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus including (1) spark plug, (2) pressure transducer, (3) charge and discharge valves, (4) gas mixing equipment, (5) high-speed camera and (6) obstacles. experim

جهت امکان تصویربرداری از شعله یک وجه محفظه (cm ۸ × ۵۰) از جنس پلکسی گلس^۱ شفاف با ضخامت ۲۰ mm ۲۰ استفاده شده است. جهت مطالعه و بررسی رفتار انتشار جبهه شعله با حضور مانع متخلخل، در یک مقطع از مسیر جریان دو مانع متخلخل که به صورت قرینه بر روی سطح پایینی و بالایی محفظه نصب شده، استفاده گردیده است. در شکل ۳ این مانع در فاصله cm ۵ از محل جرقه نشان داده شده است. جنس مانع از نیکل بوده که درصد تخلخل آن ۹۵ و دارای ۲۰ حفره در اینچ مربع میباشد. ابعاد مانع متخلخل آن ۵ م و دارای ۲۰ حفره در اینچ مربع میباشد. ابعاد مانع متخلخل آن محیط متخلخل شده است. اثر این مانع در چهار فاصله متخلف از محل جرقه به صورت، حالت ۱: cm ۵ ، حالت ۲: cm مالت ۳: cm ۵ و حالت ۴: cm ۲۰ بررسی شده است.

جهت ایجاد جرقه از شمع که در مرکز وجه ابتدایی محفظه واقع شده و ترانس ولتاژ بالا استفاده شده است. عکسبرداری به کمک دوربین samax-s با قابلیت عکسبرداری رنگی و سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه بوده که برای کار حاضر با توجه به سرعت پدیده مورد نظر و حفظ کیفیت تصاویر، عکسبرداری با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه انجام شده است. تغییرات فشار داخل محفظه به کمک مبدل فشار^۲ WIKA مدل ۱۰-S که در رنج فشار bar

¹ Plexiglass

² Pressure transmiter

³ Data logger



bar شکل ۴: تصویر پیشروی جبهه شعله در محفظه حاوی مخلوط استوکیومتری متان-هوا در فشارا bar Fig. 4. High-speed images of premixed methane-air flame front in closed duct at a pressure of 1 bar.

$$\varphi = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoic}} \tag{(Y)}$$

فرآیند تزریق مخلوط به محفظه احتراق به این صورت میباشد که، ابتدا داخل محفظه با هوای خشک کمپورسور جایگزین میشود و در ادامه فشار محفظه احتراق با کمک پمپ خلاء تا فشار مطلق bar ۰/۰۵

$$C_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{P_i}{P_T} \tag{(a)}$$

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2$$
 (2)



شکل ۵: تصویر پیشروی جبهه شعله در محفظه حاوی مخلوط استوکیومتری متان-هوا در فشار ۱ bar با مقدار ناچیزی ناخالصی بر روی جرقهزن (فاصله بین دو تصویر متوالی ms ۱۰ میباشد)

Fig. 5. High-speed images of premixed methane-air flame front in closed duct at a pressure of 1 bar with a small amount of impurities on the igniter (the distance between two consecutive images is 10 ms).

کسر مولی ۰/۱ برای متان است به داخل محفظه تا فشار نهایی ۱ bar مقدار ۰/۰۹۵ bar و فشار جزئی هوا برابر ۰/۹۰۵ میباشد. با توجه به به آرامی تزریق می گردد. در واقع میزان سهم فشار مخلوط تزریق شده رابطه (۵) کسر مولی نهایی متان برابر ۲-۰/۰۹۵ C_{ch}۴

کاهش داده می شود سپس مخلوط پیش آمیخته متان-هوا که داری برابر ۰/۹۵ bar می باشد و سهم متان از این فشار برابر ۰/۱ آن یعنی



شکل ۶: موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله بر حسب زمان به همراه فاصله اطمینان ۹۷/۵ درصد Fig. 6. The flame front position and flame front velocity as a function of time with a confidence interval of 97.5%,

۱ bar انجام شده است. جهت اطمینان از صحت کارکرد مجموعه آزمایشگاهی و همچنین بهترین حالت عکسبرداری، آزمایش مورد نظر هفت بار تکرار شده که در شکل ۴ و ۵ نتیجه عکسبرداری برای دو آزمایش با شرایط یکسان نشان داده شده است. اولین تصویر در زمان ۱۰ ms بوده و گام زمانی تصاویر به ترتیب نیز ۱۰ s شکل ۴ تصاویر حاصل از عکسبرداری از فرآیند انتشار جبهه

شعله مخلوط استوکیومتری متان-هوا در شرایط اتاق عکسبرداری شعله مخلوط استوکیومتری متان-هوا در شرایط اتاق عکسبرداری تاریک را نشان میدهد. نتایج تشکیل گل لاله کلاسیک را که شامل تشکیل شعله کروی، حالت انگشتی، حالت تخت و تشکیل گل لاله است را نشان داده و از لحاظ شکلی و ترتیب مراحل رشد شعله به خوبی با نتایج مشابه [۷ و ۱۵ و ۱۹–۱۷ و ۲۲ و ۲۷–۲۵] هم خوانی داشته و بر اساس نتایج ماتالون و متزنر [۲۶] تخت شدن شعله در وسط کانال (در فاصله ۲۵ کا از محل جرقه) رخ داده است. ابتدا شعله به صورت کروی تشکیل شده و پس از برخورد با دیوارههای محفظه حالت انگشتی به خود گرفته و در مرحله بعد شعله به صورت کشیده در آمده و در زمان ۳s ۵۰ جبهه شعله به طور کامل تخت شده و فرآیند وارونگی جبهه شعله (پدیده گل لاله) آغاز می گردد. در ادامه پیشرفت شعله، شعله گل لاله در جبهه شعله در محدوده زمانی ادامه پیشرفت شعله، شعله گل لاله در جبهه شعله در محدوده زمانی

همان طور که در شکل ۴ دیده می شود لبه بالایی گل لاله از لبه پایینی جلو میزند و با نتایج زنگ [۲۲] هم خوانی دارد. با توجه به و کسر مولی هوا برابر $C_{air} = \cdot / 9 \cdot 0 / 1 = \cdot / 9 \cdot 0$ شده است. در نتیجه حالت نهایی مخلوط در محفظه آماده برای آزمایش، مخلوط استوکیومتری متان-هوا ($(\phi = 1)$) است.

۳- نتايج

۱–۳-رفتار شعله در محفظه بدون مانع

آزمایشهای انجام شده در دمای ${
m C^o}$ ۲۵ و فشار مخلوط برابر



شکل ۷ : تغییرات فشار اندازهگیری شده در داخل محفظه بر حسب زمان با توجه به میانگین مقادیر برای چهار بار تکرار به همراه فاصله اطمینان ۹۷/۵ درصد





شکل ۸ : تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله 5 cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی 5 ms میباشد)

Fig. 8. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 5 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

در شکل ۵ آلودگی ناشی ذرات غبار بر روی جرقهزن در میدان جریان به صورت نقاط نورانی دیده میشوند. این نقاط نورانی به درک بهتر از جریان حاکم بر این پدیده نیز کمک میکند. با توجه و مقایسه دو تصویر جریان در زمان ۴۰ ms و ۳۰ که جبهه شعله به شکل تخت تبدیل شده است، جریان برگشتی که در پشت جبهه شعله شکل گرفته به وضوح دیده میشود که میتوان به عنوان یکی از علتهای اصلی تشکیل شکل لالهای جبهه شعله از آن نام برد که گنزالس و همکاران]۱۲[به کمک شبیه سازی عددی، جریان برگشتی و تشکیل جریان گردابهای را در پشت جبهه شعله نشان دادهاند. شکل شماره ۶ موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله را بر حسب زمان نشان می دهد. در زمان ۳۵ ۵ و موقعیت شعله در فاصله cm



ms ۴۳ شکل ۹: بزرگنمایی تصویر از آشفتگی ایجاد شده در حالت ۱ و زمان ۲۴ Fig. 9. Image magnification of the turbulence created in case 1 and time 43 ms.

نتایج دان-رانکین [۱۸] دلیل آن سرعت واکنش نسبتاً کند متان و همچنین ابعاد محفظه در پژوهش حاضر بوده که امکان تأثیر نیروی شناوری بر پدیده مورد نظر را فراهم کرده و شکل جبهه شعله به این صورت تغییر شکل داده است.





میدهد. مقادیر فشار در شکل شماره ۷ حاصل از میانگین مقادیر فشار اندازه گیری شده برای چهار بار تکرار آزمایش بوده است و میزان عدم قطعیت با فاصله اطمینان ^۲ ۹۷/۵ درصد محاسبه و در شکل نشان داده شده است. همخوانی نتایج برای ۴ بار تکرار آزمایش نشان دهنده صحت و دقت قابل قبول برای ابزارهای اندازه گیری به کار رفته و همچنین روش مخلوط و تزریق گاز و سیستم جرقهزن نیز میباشد. حداکثر فشار داخل محفظه در طی این فرآیند در حدود kr ک میباشد که انطباق بسیار خوبی با کار مشابه این پژوهش که توسط دان-رانکین [۱۳] انجام گرفته است داشته و در واقع اعتبارسازی ابزارهای اندازه گیری و درستی روش کار حاضر نیز میباشد. ۲۵ شیب خط تقریباً صفر شده که نشاندهنده توقف شعله به طور لحظهای بوده و با توجه به شکل شعله، همان آغاز تخت شدن جبهه شعله و مقدمه تشکیل شعله گل لاله نیز میباشد. شعله در ابتدای رشد خود با سرعت ۱/۸ m/s شروع به رشد کرده و از زمان ۱۵ تا ۳۰ ms با شتاب ثابت حدوداً ۳/۶ m/۶ رشد کرده و حداکثر سرعت ۳۰ میله به مقدار ۵ ۹ میرسد. در ادامه شتاب جبهه شعله منفی شده و سرعت جبهه تا مقدار نزدیک به صفر میل میکند. پدیده برگشت جبهه شعله همگام با توقف لحظهای نوک جبهه شعله اتفاق میافتد و در ادامه جبهه شعله به شکل گل لاله با سرعت تقریبی ۲ m/s به پیشروی ادامه میدهد.

شکل شماره ۷ تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان را نشان

1 Confidence interval



ms 48 شکل ۱۱ : بزرگنمایی تصویر از آشفتگی ایجاد شده در حالت ۲ و زمان Fig. 11. Image magnification of the turbulence created in case 2 and time 48 ms.

۲–۳-رفتار شعله در محفظه با حضور مانع متخلخل در مسیر جبهه شعله

نتایج عکسبرداری برای چهار حالت بیان شده در شکلهای ۸،۱۰ ۲۱ و ۱۴ نشان داده شده است. اولین تصویر در تمامی حالتها

در زمان ۳ ۱۰ بوده و گام زمانی تصویرها ۳ ۵ میباشد. این چهار حالت جهت مقایسه در کنار هم نمایش داده شده و در هر حالت تنها برای وضوح کامل پدیده از ترکیب رنگ مناسب مربوط به آن استفاده شده است. در هر چهار حالت وجود مانع متخلخل با مقداری تفاوت باعث ایجاد آشفتگی در میدان جریان و همچنین جبهه احتراق می گردد. حالت ۱ با وجود آشفتگی ایجاد شده با توجه به نزدیکی مانع به محل جرقه تأثیر چندانی بر موقعیت تخت شدن شعله و تشکیل شعله گل لاله ندارد و ترتیب رشد جبهه شعله مشابه محفظه بدون مانع بوده است. تشکیل شعله گل لاله در حدود زمان ۴۸ ms و در فاصله ۲۵ Cm از محل جرقه شکل می گیرد.

شکل ۸ تصویر شعله در حالت ۱ را نشان میدهد که پس از تخت شدن شعله (زمان ۴۸ ms بعد از ایجاد جرقه و فاصله ۲۵ cm از محل



شکل ۱۲: تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله 15 cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی 5 ms میباشد)

Fig. 12. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 15 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

توجهي از آن عبور مي كند.

شکل ۹ بزرگ نمایی برای حالت ۱ در زمان ۴۳ ms را نشان

میدهد و آشفتگی ایجاد شده حاصل از مانع متخلخل که به صورت

گردابهای و قرینه است در پشت مانع دیده می شود. همان طور که در تصویرهای ۸ و ۹ دیده می شود، جریان محصولات احتراق بعد از سرعت گرفتن، در داخل مانع متخلخل نفوذ کرده و مقدار قابل

شکل ۱۰ تصویر شعله در حالت ۲ را نشان میدهد که در ظاهر

تفاوت بسیار کمی با حالت ۱ داشته ولی میزان آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان و بخصوص در لایه مرزی نزدیک دیواره که نقش اساسی

در پدیده برگشت شعله دارد بیشتر شده است. دلیل افزایش میزان

آشفتگی نسبت به حالت ۱ فاصله بیشتر مانع از محل جرقه و در

نتيجه برخورد جبهه شعله به مانع با سرعت بيشتر بوده و اين آشفتگي



ms 45 شکل ۱۳ : بزرگنمایی تصویر از آشفتگی ایجاد شده برای حالت ۳ در زمان Fig. 13. Image magnification of the turbulence created in case 3 and time 45 ms.

جرقه) و آغاز تشکیل شعله گل لاله، جریان برگشتی ایجاد شده که در تصاویر دیده می شود. در این حالت از قسمت شماره ۹ شکل شعله، حالت برگشت جبهه شعله آغاز شده و در ادامه فرآیند پیشروی شعله، جریان برگشتی نیز به وضوح دیده می شود.

شکل ۱۴ : تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله 20 cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی 5 ms میباشد)

Fig. 14. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 20 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

۳۲۳٥



شکل ۱۷ : موقعیت جبهه شعله بر حسب زمان برای پنج حالت مختلف

Fig. 17. The position of the flame front as a function of time for five different cases.



Time(ms)



Fig. 18. Measured pressure inside the chamber as a function of time for five different cases with a confidence interval of 97.5%.

در پشت جبهه شعله وجود داشته و همان طور که در تصویر شماره ۱۲ دیده می شود تغییر قابل توجهی بر نحوه برگشت جبهه شعله و ترکیب شکل گل لاله گذاشته است و دیده می شود که جبهه شعله برگشتی حالت کاملاً تخت به خود گرفته است. در صورتی که در حالتهای ۱ و ۲ جبهه برگشتی مثلثی شکل بوده است. شکل ۱۴ تصویر شعله در حالت ۴ می باشد. همانطور که در



شکل ۱۵ : بزرگنمایی تصویر از آشفتگی ایجاد شده در حالت ۴ و زمان 55 ms

Fig. 15. Image magnification of the turbulence created in case 4 and time 55 ms.



ms 79 شکل ۱۶ : بزرگنمایی تصویر جبهه شعله در حالت ۴ و زمان 79 Fig. 16. Image magnification of the flame front created in case 4 and time 78 ms.

در تصویر شماره ۱۱ دیده میشود. در این حالت تخت شدن جبهه شعله در حدود فاصله ۲۹ cm از محل جرقه و زمان ۵۱ ms ایجاد شده است. با مقایسه دو حالت ۱ و ۲ مشاهده میشود که آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان به وضوح موجب به تأخیر افتادن پدیده شعله گل لاله شده است. در این حالت نیز از قسمت شماره ۱۰ شکل شعله، حالت برگشت جبهه شعله آغاز شده و جریان برگشتی ایجاد شده در ادامه پیشروی جبهه شعله، مشاهده میشود.

شکل ۱۲ تصویر شعله در حالت ۳ میباشد و همانطور که دیده می شود ظاهر جبهه شعله کمی متفاوت بوده و میزان آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان و همچنین لایه مرزی نزدیک دیواره از دو حالت قبل بیشتر است. به دلیل آشفتگی نسبتاً شدید که در شکل ۱۳ بزرگنمایی آن نشان داده شده، جبهه شعله در بازه زمانی شکل ۱۳ مزرگنمایی آن نشان داده شده، جبهه شعله در بازه زمانی داشته و سپس حالت برگشت شعله شکل می گیرد. تنها این حالت در زمان تست همراه با تولید صدای صوت مانند همراه بوده است. در این حالت، متفاوت از دو حالت قبل در زمان تشکیل گل لاله آشفتگیها

شکل دیده میشود این حالت آشفتهترین شکل جریان را به خود گرفته و بزرگنمایی تصویر در زمان ۵۵ ms در شکل ۱۵ نشان داده شده و جریان برگشتی شدیدی که ایجاد شده نیز در آن به وضوح دیده میشود. جبهه شعله در بازه زمانی ۵۰ ms تا ۳۰ ۶ از فاصله دیده میشود. جبهه شعله در بازه زمانی ۲۰ شع ۲۰ تا ۳۰ ۶ از فاصله ۳۰ ms تا ۳۰ تا ۳۰ ۳۶ به صورت تخت پیشروی کرده و در نهایت جبهه شعله مشابه شعله گل لاله تشکیل میشود. در حالتهای ۳ و جریان برگشتی نسبتاً شدیدی ایجاد شده که دلیل آن سرعت زیاد جبهه شعله هنگام برخورد با مانع متخلخل و ایجاد آشفتگی شدید در میدان جریان احتراقی بوده است. حالت ۴ شکل نهایی جبهه شعله منفاوت از شعله گل لاله شده است که بزرگنمایی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

شکل ۱۷ موقعیت مکانی جبهه شعله بر حسب زمان را برای پنج حالت مختلف نشان میدهد. با توجه به شکل در پدیده شعله گل لاله و تخت شدن شعله، سرعت جبهه شعله به نزدیکی صفر میل میکند که این فرایند در منحنی تغییرات موقعیت شعله به صورت شیب صفر در منحنی دیده میشود و با توجه به آن تشکیل جبهه شعله تخت به عنوان مقدمه تشکیل شعله گل لاله، در حالت محفظه بدون مانع در فاصله ۲۵ (زمان ۵۳ ۵۵)، حالت شماره ۱ در فاصله ۲۵ (زمان فاصله ۲۹ (زمان ۵۳ ۵۵)، حالت شماره ۱ در فاصله ۲۵ (زمان حالت شماره ۳ در فاصله ۲۹ (زمان ۵۳ ۵۱)، برای حالت شماره ۳ در فاصله ۲۹ (زمان می ۵۹ (زمان ماره ۴ در فاصله ۲۶ (زمان ۶۰ ۲۳ (زمان محل جرقه آغاز می گردد.

در زمان ۴۰ میلی ثانیه موقعیت مکانی نوک شعله برای تمامی حالتها تقریباً در فاصله ۲۳۰ mm از محل جرقه واقع شده است. دیده میشود که ایجاد انسداد توسط مانع متخلخل فرایند شتاب گیری اولیه شعله را ادامه دار کرده است. برای حالت فاصله مانع در m ۵ به دلیل برخورد شعله در مراحل اولیه رشد آن با مانع آشفتگی imp ۵ به دلیل برخورد شعله در مراحل اولیه رشد آن با مانع آشفتگی شتاب گرفتن شعله نداشته است. برای حالتهای بعدی (۲۰ –۱۵ ۱۰) با بیشتر شدن فاصله (در واقع بیشتر شدن سرعت شعله هنگام برخورد با مانع) میزان آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان احتراقی بیشتر شده و این امر موجب ادامه دار شدن شتاب گیری جبهه شعله شده است.

شکل ۱۸ میانگین تغییرات فشار بر حسب زمان برای چهار حالت نشان داده شده است. تغییرات فشار برای حالتهای مختلف به

دلیل برخورد موجهای فشاری با مانع و دیوارههای محفظه تغییرات نامنظمی داشته و در این چیدمان الگوی خاصی ندارد جز مقدار حداکثر فشار که در پنج حالت در حدود زمان ms رخ داده و همچنین در چهار حالت با حضور مانع متخلخل مقدار حداکثر فشار نسبت به حالت محفظه بدون مانع برای حالت ۱: ۶ درصد کاهش، برای حالت ۲: ۹ درصد کاهش، برای حالت ۳: ۳ درصد کاهش و برای حالت ۴ مقدار ۱۱ درصد کاهش داشته است.

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش تأثیر مانع متخلخل در مسیر جریان احتراق در یک محفظه بسته به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان میدهد که: الف) آشفتگی ایجاد شده در میدان جریان توسط مانع متخلخل نقش اساسی در الگوی رشد جبهه شعله و سرعت احتراق دارد. در واقع انسداد ایجاد شده در مسیر جریان از دو نظر دارای اهمیت است: اول اینکه کاهش رینولدز شعله موجب افزایش نرخ سوزش و شتاب جبهه شعله می شود، دوم اینکه انسداد موجب افزایش رینولدز جریان و آشفته شدن آن می گردد که این خود به افزایش سطح جبهه شعله کمک کرده و نرخ سوزش را افزایش میدهد. ب) آشفتگی ایجاد شده در جریان احتراقی به موقعیت مکانی مانع متخلخل در مسیر جریان وابسته بوده و با افزایش فاصله مانع از محل اعمال جرقه میزان آشفتگی ایجاد شده افزایش می یابد که دلیل آن افزایش سرعت برخورد جبهه شعله و محصولات احتراق با مانع متخلخل مىباشد. ج) الكويى تغييرات فشار داخل محفظه بسته براى پنج حالت مورد آزمایش مشابه بوده و مقدار حداکثر فشار محفظه در حدود زمان ۳s ۲۰۰ رخ داده است. د) حداکثر فشار محفظه با حضور مانع در چهار حالت، نسبت به حالت بدون حضور مانع به ترتیب: ۶، ۹، ۳ و ۱۱ درصد کاهش داشته است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

- A جرم هوا، kg C كسر مولى، 1 kg جرم سوخت، kg
 - n تعداد مول گاز

- [9] V.y. Akkerman, V. Bychkov, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Flame oscillations in tubes with nonslip at the walls, Combustion and Flame, 145(4) (2006) 675-687.
- [10] O.d.C. Ellis, Flame movement in gaseous explosive mixtures, J. Fuel Sci., 7 (1928) 502-508.
- [11] M. Gonzalez, Acoustic instability of a premixed flame propagating in a tube, Combustion and Flame, 107(3) (1996) 245-259.
- [12] M. Matalon, Flame dynamics, Proceedings of the Combustion Institute, 32(1) (2009) 57-82.
- [13] G. Salamandra, T. Bazhenova, I. Naboko, Formation of detonation wave during combustion of gas in combustion tube, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1958, pp. 851-855.
- [14] G. Markstein, A shock-tube study of flame front-pressure wave interaction, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1957, pp. 387-398.
- [15] R. Starke, P. Roth, An experimental investigation of flame behavior during cylindrical vessel explosions, Combustion and Flame, 66(3) (1986) 249-259.
- [16] D. Dunn-Rankin, P. Barr, R. Sawyer, Numerical and experimental study of "tulip" flame formation in a closed vessel, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1988, pp. 1291-1301.
- [17] M. Gonzalez, R. Borghi, A. Saouab, Interaction of a flame front with its self-generated flow in an enclosure: The "tulip flame" phenomenon, Combustion and Flame, 88(2) (1992) 201-220.
- [18] D. Dunn-Rankin, R. Sawyer, Tulip flames: changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes, Experiments in fluids, 24(2) (1998) 130-140.
- [19] H. Xiao, Q. Wang, X. He, J. Sun, X. Shen, Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen–air flames propagating in horizontal duct, international journal of hydrogen energy, 36(10) (2011) 6325-6336.
- [20] H. Xiao, Q. Duan, L. Jiang, J. Sun, Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation

$${
m bar}$$
 فشار ، ${
m bar}$ فشار ، U_f
 M/s سرعت شعله، U_f
علائم يونانى
 ϕ نسبت هم ارزى
 ϕ دانسيته، ${
m sadd}$
 kg/m^3 مناب م
 kg/m^3 دانسيته، σ
 kg/m^3 مناب م
 kg/m^3 مناب م
 δ نسبت هم ارزى
 ϕ مناب بى بعد شعله،
 σ نسبت چگالى مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته
 σ نسبت چگالى مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته
 i مجموع گونههاى مخلوط
 T مجموع گونههاى مخلوط

مراجع

- H.M. Cho, B.-Q. He, Spark ignition natural gas engines—A review, Energy conversion and management, 48(2) (2007) 608-618.
- [2] V. Bychkov, V.y. Akkerman, G. Fru, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Flame acceleration in the early stages of burning in tubes, Combustion and Flame, 150(4) (2007) 263-276.
- [3] K. Shelkin, KI Shelkin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 10, 823 (1940), Zh. Eksp. Teor. Fiz., 10 (1940) 823.
- [4] Bychkov, A. Petchenko, V.y. Akkerman, L.-E. Eriksson, Theory and modeling of accelerating flames in tubes, Physical Review E, 72(4) (2005) 046307.
- [5] L. Landau, E. Lifshitz, Fluid mechanics, sec 60, in, Pergamon Press, Oxford, 1989.
- [6] F.A. Williams, Combustion Theory, (1985), Cummings Publ. Co, (1985).
- [7] C. Clanet, G. Searby, On the "tulip flame" phenomenon, Combustion and Flame, 105(1-2) (1996) 225-238.
- [8] D. Valiev, V. Bychkov, V.y. Akkerman, C.K. Law, L.-E. Eriksson, Flame acceleration in channels with obstacles in the deflagration-to-detonation transition, Combustion and Flame, 157(5) (2010) 1012-1021.

hazardous materials, 327 (2017) 116-126.

- [24] P. Chen, F. Huang, Y. Sun, X. Chen, Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 47 (2017) 22-28.
- [25] V.y. Akkerman, V. Bychkov, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at the walls, Combustion and Flame, 145(1-2) (2006) 206-219.
- [26] M. Matalon, P. Metzener, The propagation of premixed flames in closed tubes, Journal of Fluid Mechanics, 336 (1997) 331-350.
- [27] B. Ponizy, A. Claverie, B. Veyssière, Tulip flame-the mechanism of flame front inversion, Combustion and Flame, 161(12) (2014) 3051-3062.

in a closed combustion tube, international journal of hydrogen energy, 39(16) (2014) 8557-8563.

- [21] X. Shen, X. He, J. Sun, A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct, Fuel, 161 (2015) 248-253.
- [22] K. Zheng, M. Yu, L. Zheng, X. Wen, T. Chu, L. Wang, Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts, international journal of hydrogen energy, 42(8) (2017) 5426-5438.
- [23] K. Jin, Q. Duan, K. Liew, Z. Peng, L. Gong, J. Sun, Experimental study on a comparison of typical premixed combustible gas-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct, Journal of

بی موجعه محمد ا